

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

HENRIQUE ROSSI OTTO

ESTIMATIVA TEÓRICA DAS EMISSÕES DE METANO E APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS - ATERRO SANITÁRIO
DE CAMPO GRANDE/MS.

CURITIBA

2016

HENRIQUE ROSSI OTTO

ESTIMATIVA TEÓRICA DAS EMISSÕES DE METANO E APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS - ATERRO SANITÁRIO
DE CAMPO GRANDE/MS.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Especialização em Projetos
Sustentáveis, Mudanças Climáticas e Mercado de
Carbono do Programa de Educação Continuada
em Ciências Agrárias da Universidade Federal do
Paraná, como requisito para obtenção do título de
especialista.

Orientadora: Profa. Dra. Greyce C. Benedet Maas.

CURITIBA

2016

AGRADECIMENTO

Agradeço a todos os que me incentivaram, apoiaram e colaboraram com o êxito neste trabalho.

A minha família pelo apoio incondicional aos meus estudos e os amigos que colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Curso de Especialização em Projetos Sustentáveis, Mudanças Climáticas e Mercado de Carbono, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, na pessoa de sua coordenadora Profa. Dra. Ana Paula Dalla Corte, pelo apoio recebido.

Agradecimento especial a minha orientadora Profa. Dra. Greyce C. Benedet Maas, por todo o auxílio e disposição.

A todos que contribuíram de alguma forma.

Muito obrigado!

.

RESUMO

O desenvolvimento econômico, o crescimento populacional e o desenvolvimento urbano refletem no estilo de vida e nos modos de produção e consumo da população. Como efeito direto destes processos, ocorre um aumento na produção de resíduos sólidos, principalmente nos centros urbanos. É a disposição irregular dos resíduos sólidos urbanos que constitui um dos principais entraves ao desenvolvimento sustentável, sendo responsável por problemas ambientais e sociais, assim como mudanças climáticas. Em busca de atenuar as consequências desses efeitos, atualmente, há um crescente interesse no aproveitamento energético do metano, tema deste trabalho. Propõe-se como objetivo a verificação da possibilidade de aproveitamento do metano produzido no Aterro Sanitário Dom Antônio Barbosa II, situado em Campo Grande/MS. Com base na metodologia sugerida pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (2000), estimou-se a geração de metano (CH_4), determinou-se o potencial energético e propôs-se a utilização de sistema de motores de combustão interna – Ciclo Otto, para aproveitamento energético do CH_4 . Em análise projetou-se que no ano de 2020, o aterro alcançará sua vazão máxima a ser recuperado para geração de energia, $1.147,37 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{h}$, cujo potencial energético calculado foi de 2,05 MW. A estimativa vem de encontro com a hipótese de que o volume de metano gerado apresenta potencial para recuperação energética, uma vez que suprirá a demanda por energia do próprio aterro e gerar excedente.

Palavras-Chave: Biogás; Meio Ambiente; Potencial Energético; Energia de Biomassa.

ABSTRACT

The economic development, population growth and urban development reflect in the way of life and the modes of production and consumption of the population. As a direct effect of these processes, there is an increase in solid waste production, especially in urban centers. It is the irregular disposition of urban solid waste that is one of the main obstacles to sustainable development, being responsible for environmental and social problems, as well as climate change. In order to mitigate the consequences of these effects, there is currently a growing interest in the methane energy use, the subject of this work. We propose as objective the verification of the possibility of using the methane produced at Dom Antônio Barbosa II Landfill, located in Campo Grande/MS. Based on the methodology suggested by the Intergovernmental Panel on Climate Change (2000), methane (CH_4) was estimated, the energy potential was determined and the internal combustion engine system - Otto Cycle was proposed, for energy utilization of the CH_4 . In the analysis it was projected that in the year 2020, the Landfill will reach its maximum flow to be recovered for power generation, $1,147.37 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{h}$, whose calculated energy potential was 2.05 MW. The estimation comes with the hypothesis that the volume of methane generated presents potential for energy recovery, since it will supply the energy demand of the Aterro itself and generate surplus.

Keywords: Biogas; Environment; Energy Potential; Biomass Energy.

LISTA DE FÓRMULAS

Equação 1 - Geração de gás metano (tCH_4 /ano):	18
Equação 2 - Emissão de gás metano (tCH_4 /ano):	19
Equação 3 - Potencial de geração de metano do resíduo ($tCH_4/tRSU$):	19
Equação 4 - Fração de carbono degradável:	19
Equação 5 - Fator de correção da somatória:	20
Equação 6 - Potência disponível (MW):	20
Equação 7 - Energia disponível (MWh/dia):	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de Resíduos Encaminhados ao Aterro Sanitário	17
Tabela 2 – Tabela de Composição do Resíduo.	22
Tabela 3 – COD - Carbono Orgânico Degradável no Ano (tCH ₄ /tRSU).	22
Tabela 4 - Vazão de CH ₄ do Aterro Sanitário Dom Antônio Barbosa II.	23
Tabela 5 - Potência e Energia disponíveis no Aterro DAB II.	25

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Precipitação acumulada (mm). Campo Grande/MS – 2006-2015 ..	13
Gráfico 2 - Temperatura Média (°C) - Campo Grande/MS – 2006-2015	14
Gráfico 3 - Emissões de Biogás, CH ₄ e Recuperação de CH ₄ para Geração de Energia (m ³ /ano).	24

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	OBJETIVOS (GERAL E ESPECÍFICO):.....	12
3.	MATERIAIS E MÉTODOS:.....	13
3.1.	LOCAL DE ESTUDO:.....	13
3.1.1	LOCALIZAÇÃO:.....	13
3.1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO:.....	15
3.1.3	DESCRIÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO:	15
3.2.	ABORDAGEM DO ESTUDO:	16
3.3.	METODOLOGIA:.....	16
3.3.1.	DADOS FORNECIDOS:	17
3.3.2.	DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE CH ₄ A SER PRODUZIDO	18
3.3.3.	DETERMINAÇÃO DE POTENCIAL ENERGÉTICO:	20
3.4.	TECNOLOGIA PARA O APROVEITAMENTO DO BIOGÁS:	21
4.	RESULTADOS:	21
4.1.	ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE CH ₄ :	21
4.2.	ESTIMATIVA DE ENERGIA DISPONÍVEL.....	24
4.3.	SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E APROVEITAMENTO:.....	26
5.	CONCLUSÃO:.....	27
6.	REFERÊNCIAS:.....	29

1. INTRODUÇÃO

O aumento das emissões de gases provenientes de fontes antropogênicas tem sido uma das causas do aumento do efeito estufa e contribui para o aquecimento global e para as mudanças climáticas (IBAMA, 2013).

O Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (2012), define como mudanças climáticas as alterações no estado natural do clima que podem ser identificadas pela modificação persistente de suas características médias, podendo ocorrer devido a processos naturais ou antrópicos.

Conforme o Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa, em sua comunicação inicial, Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT (2004), o clima na Terra é regulado pelo fluxo de energia solar que atravessa a atmosfera na forma de luz visível. Parte dessa energia é devolvida pela Terra na forma de radiação infravermelha.

Os gases de efeito estufa são gases presentes na atmosfera terrestre e possuem a propriedade de bloquear parte dessa radiação infravermelha. Muitos existem naturalmente na atmosfera e são responsáveis pelo efeito estufa natural, ou somente efeito estufa (MCT, 2004).

No entanto, como consequência das atividades humanas, a biosfera tem apresentado aumento nos níveis de concentração de alguns desses gases, o que ocasiona o efeito estufa antrópico, ou seja, ocasionado pelo homem, que ocasionam mudanças climáticas por todo o planeta (MCT, 2004).

Uma forma de gerar tais gases, diz respeito aos resíduos sólidos, nas fases de tratamento ou disposição final, que emitem dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (GOUVEIA, 2012).

Além dos impactos relacionados às mudanças climáticas, a disposição inadequada destes resíduos gera outros problemas ambientais e riscos à saúde da população (GOUVEIA, 2012).

A concentração atmosférica de metano, por exemplo, aumentou 151% desde 1750 e sua concentração continua aumentando (IPCC, 2007a). Segundo dados do Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões de Gases de Efeito Estufa, Ministério de Ciência e Tecnologia e Inovação – MCTI (2016), as emissões referentes ao setor de tratamento de resíduos representaram 14,8% do total

das emissões de CH₄ no ano de 2010, sendo a disposição de resíduos sólidos responsável por 53,9% desse valor. No período 2005 a 2010, as emissões de CH₄ do setor de Tratamento de Resíduos tiveram aumento de 19,4%.

De acordo com a United States Environmental Protection Agency - EPA (1998) são quatro as principais formas de relação entre Resíduos Sólidos Urbanos - RSU e o efeito estufa: emissão de dióxido de carbono (CO₂) decorrente do consumo de energia para extração e produção dos bens (incluindo a extração e processamento dos combustíveis a serem usados), emissão de CO₂ oriunda do consumo não-energético de combustíveis no processo de produção dos bens, emissão de metano (CH₄) a partir dos aterros sanitários em que os materiais acima e os restos de alimentos são depositados e se decompõem e fixação de carbono das parcelas dos materiais que não se decompõem nos aterros sanitários.

Nesse sentido justifica-se a necessidade de estudos sobre a geração e emissão de biogás, principalmente o metano, por seu alto potencial de aquecimento global, originários principalmente dos aterros de RSU (REGATTIERI, 2009).

O aterro sanitário é uma das principais formas de disposição final de resíduos no Brasil, 58,3% dos RSU coletados em 2014, tiveram destinação final adequada (ABRELPE, 2014).

A emissão descontrolada de biogás geram graves problemas de poluição atmosférica que necessita ser mitigado. A emissão dos gases, oriundos da decomposição da matéria orgânica presente no RSU, é um dos precursores do efeito estufa, que está relacionado ao aquecimento do global, objeto de grandes discussões nos últimos anos (FERNANDES et al., 2009).

O controle das emissões de biogás diminui a possibilidade de instabilidade geotécnicas dos aterros sanitários devido ao acúmulo de gases em seu interior, evitando problemas ambientais, além de possibilitar um melhor aproveitamento do potencial energético dos aterros sanitários (COELHO et al., 2006).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei 12.305, em seu Artigo 3º, parágrafo VII, define destinação final ambientalmente adequada, como sendo a destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a

compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético, fomentando tais iniciativas.

O aproveitamento energético do CH_4 , gerado pelo processo de decomposição dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é uma alternativa promissora. Embora não se tenha dimensões suficientes para apresentar uma estratégia de expansão da oferta de energia elétrica do país no longo prazo. A geração de eletricidade por fontes alternativa é elemento importante de uma estratégia regional ou local de geração de energia (EPE, 2008).

O Plano Nacional de Energia 2030 – PNE 2030 (EPE, 2007) considera que para o ano de 2030, se terá um potencial de geração de eletricidade com resíduos urbanos, por meio do biogás oriundo de aterros de até 2.600 MW, em termelétricas utilizando resíduos sólidos.

Atualmente a ANEEL (2016), informou a presença de 15 unidades de biogás, referentes ao setor de resíduos sólidos, as quais apresentam uma potência instalada total de 117,76 MW.

Desta maneira, o uso de biogás proveniente de aterros sanitários tem sido indicado como uma das alternativas para geração de energia, na busca por resultados significativos quanto às questões ambientais, econômicas, entre outros aspectos (COELHO et al., 2006).

2. OBJETIVOS (GERAL E ESPECÍFICO):

Este trabalho realizado com base nos dados do Aterro Sanitário Dom Antônio Barbosa II, em Campo Grande/MS, tem como objetivo avaliar o potencial para geração de energia elétrica a partir da produção de CH_4 , pela decomposição dos resíduos orgânicos do aterro sanitário.

Dentre os objetivos específicos procurou-se:

- Calcular teoricamente as emissões de gás metano (CH_4) durante os anos de operação e após seu encerramento;
- Determinar a capacidade de produção de energia elétrica, com aproveitamento do metano produzido;
- Indicar tecnologia para aproveitamento energético do metano (CH_4);

3. MATERIAIS E MÉTODOS:

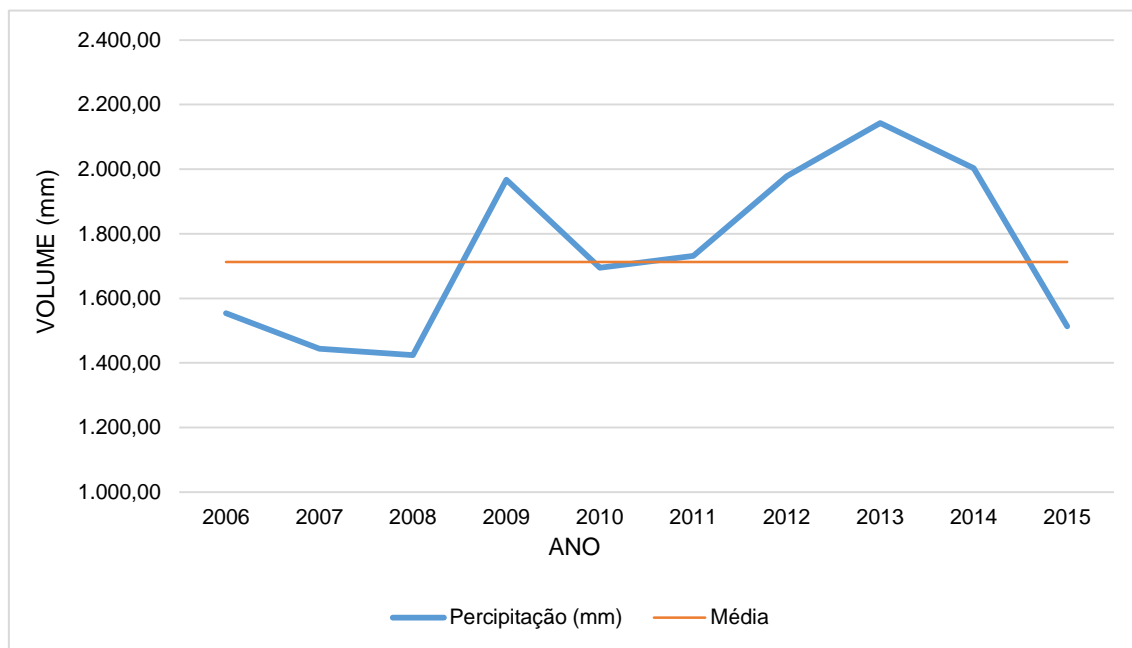
3.1. LOCAL DE ESTUDO:

3.1.1 LOCALIZAÇÃO:

O município de Campo Grande, conforme IBGE (2011) apresenta uma população urbana de 776.242 habitantes, e conforme projeções da PMCG (2012), no ano de 2020, contará com a uma população de 924.613 habitantes, conforme PMCG (2016), seu perímetro urbano abrange uma área de 35.903,53 ha, apresenta uma taxa de urbanização de 98,66% e densidade demográfica de 97,22 hab/km², e de acordo com PMCG (2012) desde 2012, a coleta domiciliar é feita em 100% da sua área urbana.

O clima, segundo a classificação de Koppen apud PMCG (2016), situa-se na faixa de transição entre o subtipo (Cfa) mesotérmico úmido sem estiagem ou pequena estiagem e o sub-tipo (Aw) tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno. O município apresenta uma precipitação média anual de 1.712,9 mm, entre os anos de 2006 e 2015, não ficando abaixo dos 1.423 mm, conforme indicado no gráfico 01.

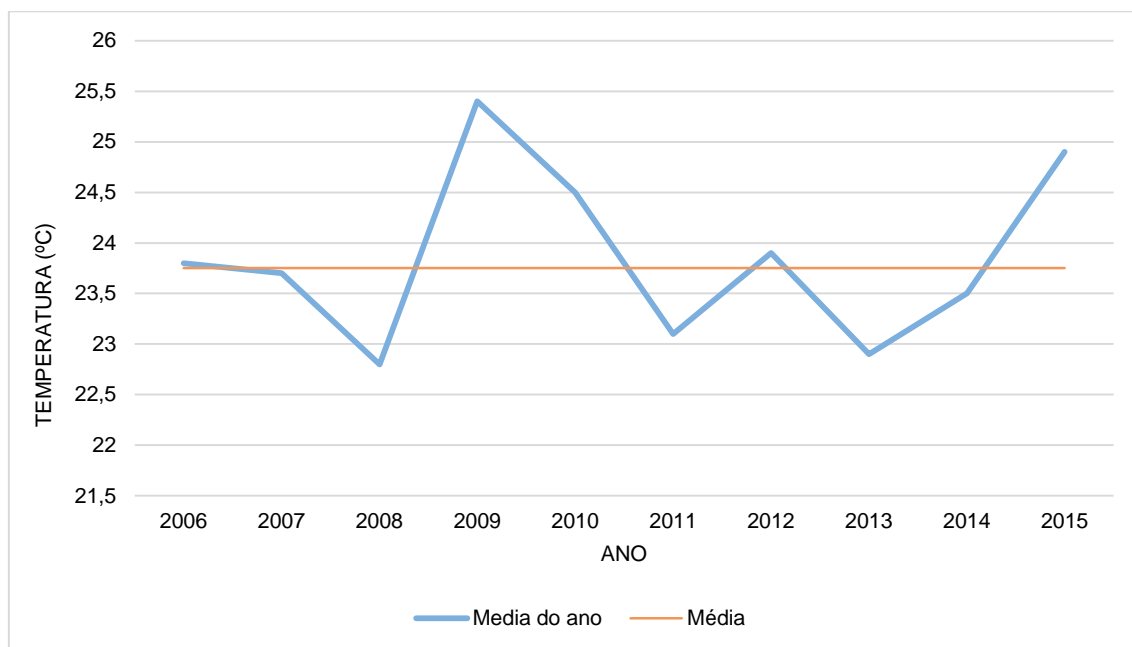
Gráfico 1 - Precipitação acumulada (mm). Campo Grande/MS – 2006-2015



Fonte: PMCG (2016).

A temperatura apresenta uma média anual de 25,75 °C, entre os anos de 2006 e 2015, sempre acima dos 22,8 °C, conforme indicado no gráfico 02.

Gráfico 2 - Temperatura Média (°C) - Campo Grande/MS – 2006-2015.



Fonte: PMCG (2016).

O Aterro Sanitário Dom Antônio Barbosa II, está localizado no município de Campo Grande, capital do Estado de Mato Grosso do Sul, nas coordenadas 20°33'41.2"S 54°39'41.0"W. Encontra-se ao sul da zona urbana, a aproximadamente 12 quilômetros do centro, no km 350 do Anel Viário da Região Sul de Campo Grande, entre o entroncamento da BR 163 (São Paulo) e entroncamento da BR 060 (Sidrolândia).

De acordo com levantamentos realizados para esta pesquisa, foi iniciado pela Prefeitura Municipal de Campo Grande – PMCG, o projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL para o Aterro Sanitário de Campo Grande, que buscava a obtenção de créditos de carbono por meio da queima do metano. No entanto, o projeto foi interrompido, após a elaboração do Documento de Concepção do Projeto – DCP, não sendo encaminhado para validação pela Autoridade Nacional Designada. Deste modo o projeto de MDL não foi registrado junto à base de dados, MCTI e da United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC.

3.1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO:

O Aterro Sanitário Dom Antônio Barbosa II, é o local de disposição final de toda a coleta de Resíduos Sólidos Urbanos, Classe II-A, não inertes, do Município de Campo Grande/MS, administrado pela Concessionária C.G. SOLURB Soluções Ambientais SPE LTDA, por meio de Parceria Público Privada (PPP), iniciou suas operações em novembro de 2012, e tem vida útil estimada em oito anos.

3.1.3 DESCRIÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO:

Conforme proposta técnica da empresa SOLURB (2012), a célula de disposição dos resíduos abrange área de 26 hectares, sendo que, as profundidades das escavações de fundo da célula variam entre 2,50 m a 4,50 m e estão limitadas devido à distância mínima permitida entre a superfície acabada do fundo da trincheira e o lençol freático.

Com relação ao sistema de impermeabilização da base do aterro, o projeto indica a instalação de geomembrana PEAD de 2,00 mm de espessura no fundo, taludes e ombreiras do perímetro da célula. O sistema de drenos de líquido percolado (“chorume”) é composto por linhas de drenos tubulares em PEAD perfurados e drenos sem tubo (drenos “cegos”) executados na base da célula sobre a camada de proteção da geomembrana PEAD, e tem como objetivo drenar e escoar o “chorume” aos emissários que despejarão os líquidos percolados na lagoa de acúmulo SOLURB (2012).

Os drenos de gás previstos no projeto de implantação do aterro sanitário de Campo Grande são compostos por tubos porosos de concreto no diâmetro 40 cm assentados na vertical em lastro de pedra sobre os drenos de base de líquido percolado e envoltos por uma camisa de 100 cm de espessura de pedra de mão confinadas com tela de viveiro no fio 24 e malha 1,5 cm em aço galvanizado. O gás emitido neste sistema é queimado por sistema de *Flares*, SOLURB (2012).

3.2. ABORDAGEM DO ESTUDO:

A estratégia de pesquisa adotada foi o estudo de caso. O objeto de estudo foi o Aterro Sanitário Dom Antônio Barbosa II, no qual teve como abordagem o aproveitamento energético do CH_4 presente nas emissões geradas pela deposição dos materiais orgânicos, utilizando como sistema de transformação energética motores de combustão interna do tipo “Ciclo Otto”.

Partindo da coleta e análise dos dados fornecidos pela concessionária C.G. SOLURB, que abrange a coleta, destinação final e característica dos RSU, foi desenvolvido um estudo sobre a geração e emissões de CH_4 , determinando o potencial para o aproveitamento energético por meio da geração de energia elétrica do Aterro Sanitário Dom Antônio Barbosa II.

3.3. METODOLOGIA:

Os modelos existentes para quantificação da geração de gases em aterros sanitários podem ser estequiométricos (cálculo estático) ou estimativas cinéticas (simulação dinâmica). No modelo estequiométrico é desenvolvido o cálculo da produção máxima teórica, com base nas reações de decomposição anaeróbia da matéria orgânica. Nas estimativas cinéticas, as taxas de produção de gás são descritas por modelos baseados em equações matemáticas, que simulam o processo biológico e físico-químico da produção de biogás no aterro, ao longo do tempo (PARASKAKI e LAZARIDIS, 2005).

Optou-se para este trabalho o modelo de pesquisa baseado em estimativas cinéticas, sendo utilizados os modelos matemáticos indicados como metodologia no Guia de Boas Práticas e Gerenciamento de Incertezas para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, IPCC (2000), Tier 2, para quantificação das emissões de CH_4 dos resíduos disposto no aterro sanitário objeto deste estudo.

A tecnologia aplicada para a geração de energia a partir da fração do metano a ser recuperado e utilizado para conversão energética possibilita a estimativa da potência e da energia disponíveis no aterro. Assim foi utilizado ICLEI (2009) como base metodológica, para calcular a potência (MW) e a

energia (MWh/dia) disponíveis no aterro ano a ano, utilizando como sistema de transformação energética motores de combustão interna do tipo “Ciclo Otto”.

3.3.1. DADOS FORNECIDOS:

Os dados utilizados neste trabalho em sua maioria foram fornecidos pela concessionária C.G. SOLURB SOLUÇÕES AMBIENTAIS SPE LTDA. Estes dados se referem a coleta e disposição final de RSU, no período de novembro de 2012 a dezembro de 2016, e tem como base os tickets de pesagem dos caminhões em sua entrada e após sua descarga no Aterro, em balança certificada trimestralmente pelo INMETRO. As projeções da produção de resíduos gerados de 2017 até a data estimada de encerramento do Aterro Sanitário DABII foram extraídas do Plano Municipal de Saneamento Básico de Campo Grande (2012). A Tabela 1 apresenta a quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos depositados no aterro sanitário, assim como suas projeções:

Tabela 1 – Quantidade de Resíduos Encaminhados ao Aterro Sanitário.

Ano	Quantidade de resíduos (t/ano)
2012	46.361,77
2013	254.499,68
2014	271.651,74
2015	269.953,19
2016	266.245,59
2017	285.550,72
2018	294.347,53
2019	303.211,25
2020	312.138,88

Fonte: SOLURB 2016/PMCG 2012 (Adaptado).

As análises de composição gravimétrica dos RSU, também fornecidas pela concessionária, são realizadas trimestralmente a fim de atender as condicionantes da Licença de Operação do empreendimento e que tem como base metodológica o Manual de Resíduos Sólidos da CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1990). Assim, para este trabalho, foram desenvolvidas médias com base nos relatórios trimestrais da composição do resíduo dos anos para os anos de 2013 a 2016. A estimativa da

composição dos resíduos dos anos subsequentes foi realizada com base nas médias anuais dos anos anteriores, sendo repetida de 2017 a 2020.

3.3.2. DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE CH₄ A SER PRODUZIDO

Para o cálculo do potencial de geração de metano no aterro, foi utilizada a metodologia sugerida pelo IPCC (2000), contidas no Módulo 5 – Lixo, do Guia de Boas Práticas e Gerenciamento de Incertezas para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, referentes às Diretrizes Revisadas do IPCC (1996) e utilizou como fonte de dados o Módulo 5 – Resíduos, no Volume 2: Geração de Resíduos, Composição e Gestão de Dados, e o Volume 3: Disposição de Resíduos Sólidos, do IPCC (2006), para indicação de valores padrões utilizados.

IPCC (2000), indica dois métodos para estimar as emissões de CH₄ dos locais de disposição de resíduos sólidos, o método padrão (Tier 1) e o método de Decaimento de Primeira Ordem (Tier 2).

Assim, este trabalho utiliza o Tier 2, por refletir com mais precisão a tendência de emissões ao longo do tempo. A utilização desse método requer dados históricos sobre as quantidades, composição e gestão dos resíduos dispostos no local de estudo (IPCC, 2000).

Com a adoção desta metodologia para determinação do potencial de produção CH₄, foram utilizadas as formulas abaixo:

Equação 1 - Geração de gás metano (tCH₄/ano):

$$CH_{4_{\text{gerado}}} = \sum [L_{o(x)} * MSW_{T(x)} * MSW_{F(x)} * A * k * (e^{-k(t-x)})]$$

Sendo que:

CH₄ gerado: geração de gás metano (tCH₄/ano);

t: ano inicial de disposição ou de cálculo inicial;

x: ano de interesse para o qual deverá inserir os dados;

A: fator de correção da somatória;

MSWT: total de resíduos disposto no ano x (t);

MSWF: fração de material orgânico no resíduo no ano x (t);

k: constante de decaimento (ano^{-1});

$L_{o(x)}$: potencial de biogás gerado;

Equação 2 - Emissão de gás metano (tCH_4/ano):

$$\text{CH}_{4\text{emitido}} = (\text{CH}_{4\text{gerado}} - R_{(t)}) * (1 - \text{OX})$$

Sendo que:

$\text{CH}_{4\text{emitido}}$: emissão de gás metano (tCH_4/ano);

$R_{(t)}$: CH_4 Recuperado

OX: Fator de oxidação = 0,10

Equação 3 - Potencial de geração de metano do resíduo (tCH_4/tRSU):

$$L_o = \text{MCF} * \text{COD} * \text{COD}_f * F * 1,33$$

Onde:

L_o : potencial de geração de metano do resíduo (tCH_4/tRSU);

MCF: fator de correção do metano (%);

COD: fração de carbono degradável (tC/tRSU);

COD_f : fração de DOC dissolvida (tC/tRSU): 0,50 (IPCC, 2006, Vol.3, pg. 13)

F: fração de metano no biogás;

1,33: conversão de carbono para metano (tCH_4/tC);

RSD: resíduo sólido domiciliar;

MCF = 1 (aterro bem gerenciado);

F = 50% default (IPCC, 2006, Vol.3, pg. 15).

Equação 4 - Fração de carbono degradável:

$$\text{COD} = 0,40A + 0,24B + 0,15C + 0,43D + 0,39E$$

Sabendo-se que:

A: percentual de papelão e tecidos;

B: resíduos têxteis

C: resíduos de alimentos;

D: resíduos de madeira;

E: borracha e couro.

Equação 5 - Fator de correção da somatória:

$$A = \frac{(1 - e^{-k})}{k}$$

Onde:

A: fator de correção da somatória: 0,919619

k: constante de decaimento (ano^{-1});

3.3.3. DETERMINAÇÃO DE POTENCIAL ENERGÉTICO:

Para a determinação da potência e energia disponível, ICLEI (2009, pg. 64) apresenta como metodologia as expressões:

Equação 6 - Potência disponível (MW):

$$P = \frac{Q * PCI * \eta}{860.000}$$

Em que:

P = potência disponível (MW);

Q = vazão de metano a cada ano ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{h}$)

PCI = Poder Calorífico Inferior do CH_4 . *Default 5.500 kcal/m³CH₄* (ICLEI, 2009);

η = eficiência de motores (28%) (ICLEI, 2009);

860.000 = conversão de kcal para MW (ICLEI, 2009);

Equação 7 - Energia disponível (MWh/dia):

$$E = P * \text{Rend} * \text{Tempo de Operação}$$

Sabendo que:

E = energia disponível (MWh/dia)

Rend = rendimento de motores operando a plena carga (estimado em 87%)

Tempo de operação do motor = 24 horas/dia

3.4. TECNOLOGIA PARA O APROVEITAMENTO DO BIOGÁS:

Existem diversas alternativas para viabilizar o aproveitamento do biogás em aterros sanitários. O biogás pode ser aproveitado para geração de energia elétrica, geração de energia térmica visando geração de vapor ou tratamento de chorume, utilizando como combustível veicular e para iluminação (ICLEI, 2009).

As tecnologias que buscam a geração de energia elétrica são as mais utilizadas, sendo os motores de combustão interna, do tipo “Ciclo Otto”, os equipamentos mais utilizados para conversão do biogás em energia (COELHO et al., 2006). ICLEI (2009) apresenta como principais vantagens do sistema:

- Maior rendimento elétrico;
- Tecnologia presente no país;
- Menor custo quando comparado às outras tecnologias;
- Economia de financeira em relação à energia proveniente da concessionária;
- Geração de energia elétrica para o próprio consumo do aterro;
- Possibilidade de obtenção de receita adicional pela venda de excedente de energia;
- Possibilidade de obtenção e comercialização de créditos de carbono (considerada 100% de eficiência de queima).

Neste estudo de caso é considerada essa alternativa para aproveitamento energético do CH_4 , com a geração de energia elétrica com motores de combustão interna, do tipo “Ciclo Otto”.

4. RESULTADOS:

4.1. ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE CH_4 :

A aplicação da metodologia para determinação do potencial de produção de CH_4 (Tier 2), iniciou com o tratamento dos dados da composição

do RSU, resultando na Tabela 2. A composição gravimétrica para os anos de 2017 a 2020 foram desenvolvidas com base nas médias da composição do RSU dos anos de 2013 a 2016.

Tabela 2 – Tabela de Composição do Resíduo.

Composição do resíduo	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
A – Papéis/papelão	12,12%	17,62%	18,89%	14,83%	16,23%	16,23%	16,23%	16,23%
B – Resíduos têxteis	3,40%	7,96%	6,09%	2,39%	4,75%	4,75%	4,75%	4,75%
C – Resíduos alimentares	51,97%	37,86%	41,60%	52,71%	46,79%	46,79%	46,79%	46,79%
D – Madeira	0,47%	0,39%	0,00%	0,80%	0,43%	0,43%	0,43%	0,43%
E – Borracha e couro	0,00%	1,45%	0,11%	0,08%	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%
Outros materiais inertes	32,04%	34,72%	33,31%	29,19%	31,72%	31,72%	31,72%	31,72%

Fonte: Próprio Autor (2016).

Cada tipo de material que compõe os resíduos apresenta um conteúdo diferente de carbono orgânico degradável (COD), sendo esse o principal fator para determinação da quantidade de metano produzida durante sua decomposição. Foram utilizadas as porcentagens apresentadas na tabela 2, para cálculo do COD, tendo seus resultados demonstrados na tabela 3.

Tabela 3 – COD - Carbono Orgânico Degradável no Ano ($tCH_4/tRSU$).

Anos	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
[$tCH_4/tRSD$]	0,1366	0,1537	0,1530	0,1478	0,1486	0,1486	0,1486	0,1486

Fonte: Próprio Autor (2016).

Com os resultados do carbono orgânico degradável presentes nos resíduos para cada ano foram desenvolvidos os cálculos do potencial de geração de CH_4 do resíduo (L_0), a geração de CH_4 nos anos base, suas emissões com base em sua taxa de oxidação e o decaimento ano a ano, de suas emissões, considerando a densidade do CH_4 (0°C e 1,013 bar) como 0,0007168 t/m^3 (FIGUEIREDO, 2007). Os dados referentes aos resíduos disposto nos meses de novembro e dezembro de 2012, foram somados aos do ano de 2013.

Foi desenvolvida a tabela 04, com as emissões de CH₄ e determinar sua vazão (m³CH₄/h), ano a ano, para um período de 30 anos desde a implantação do Aterro Sanitário Dom Antônio Barbosa II.

Tabela 4 - Vazão de CH₄ do Aterro Sanitário Dom Antônio Barbosa II.

Anos	m ³ CH ₄ /ano	m ³ CH ₄ /h	tCH ₄ /ano
2013	2.682.631,37	306,24	1.922,91
2014	4.816.360,08	549,81	3.452,37
2015	6.759.189,25	771,60	4.844,99
2016	8.275.942,76	944,74	5.932,20
2017	9.753.165,00	1.113,37	6.991,07
2018	11.084.811,49	1.265,39	7.945,59
2019	12.294.290,15	1.403,46	8.812,55
2020	13.401.320,32	1.529,83	9.606,07
2021	11.306.222,45	1.290,66	8.104,30
2022	9.538.662,09	1.088,89	6.837,31
2023	8.047.433,60	918,66	5.768,40
2024	6.789.336,59	775,04	4.866,60
2025	5.727.924,41	653,87	4.105,78
2026	4.832.448,30	551,65	3.463,90
2027	4.076.966,61	465,41	2.922,37
2028	3.439.593,29	392,65	2.465,50
2029	2.901.863,84	331,26	2.080,06
2030	2.448.200,42	279,47	1.754,87
2031	2.065.460,56	235,78	1.480,52
2032	1.742.556,41	198,92	1.249,06
2033	1.470.133,53	167,82	1.053,79
2034	1.240.299,93	141,59	889,05
2035	1.046.397,42	119,45	750,06
2036	882.808,68	100,78	632,80
2037	744.794,63	85,02	533,87
2038	628.357,02	71,73	450,41
2039	530.122,71	60,52	379,99
2040	447.245,88	51,06	320,59
2041	377.325,61	43,07	270,47
2042	318.336,34	36,34	228,18
2043	268.569,17	30,66	192,51

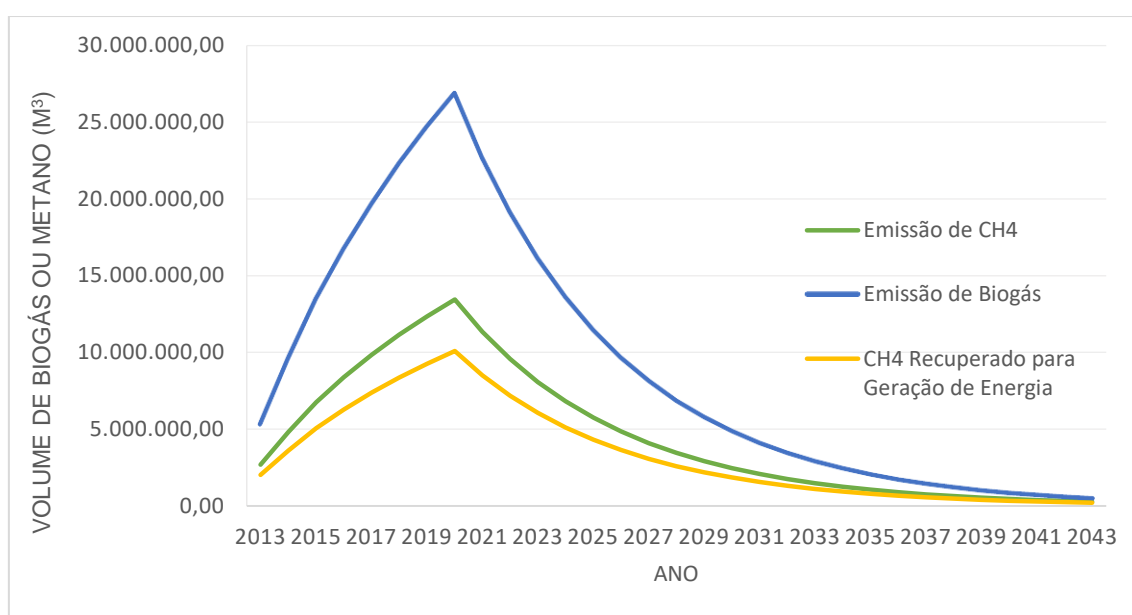
Fonte: Próprio Autor (2016).

Adotando-se a concentração de metano no biogás igual a 50% (IPCC, 2006), a quantidade de biogás será o dobro do valor, ou seja, será duas vezes

a quantidade de metano obtida na Tabela 4, e considerando que 75% do CH₄ emitido será recuperado para geração de energia (FIGUEIREDO, 2007).

Ao longo do tempo de disposição do resíduo, a produção de CH₄ é crescente, assim como seu volume recuperado para produção de energia, atingindo seu maior valor no ano de encerramento das atividades de disposição do aterro. No decaimento, a curva é dirigida pela constante k, referente à degradação da matéria orgânica no tempo, conforme apresentado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Emissões de Biogás, CH₄ e Recuperação de CH₄ para Geração de Energia (m³/ano).



Fonte: Próprio Autor (2016).

4.2. ESTIMATIVA DE ENERGIA DISPONÍVEL

Com os resultados obtidos, em função da vazão de CH₄ emitido no Aterro Sanitário DABII, foi possível estimar a potência (MW), assim como a energia disponíveis (MWh/dia), no aterro ano a ano, considerando a eficiência de 75% na captação do metano para utilização na geração de energia (FIGUEIREDO, 2007), conforme a tabela 5.

Tabela 5 - Potência e Energia disponíveis no Aterro DAB II.

Anos	Potencial Disponível (MW)	Energia Disponível (MWh/dia)
2013	0,41	8,59
2014	0,74	15,42
2015	1,04	21,64
2016	1,27	26,49
2017	1,50	31,22
2018	1,70	35,48
2019	1,88	39,36
2020	2,05	42,90
2021	1,73	36,19
2022	1,46	30,53
2023	1,23	25,76
2024	1,04	21,73
2025	0,88	18,34
2026	0,74	15,47
2027	0,63	13,05
2028	0,53	11,01
2029	0,44	9,29
2030	0,38	7,84
2031	0,32	6,61
2032	0,27	5,58
2033	0,23	4,71
2034	0,19	3,97
2035	0,16	3,35
2036	0,14	2,83
2037	0,11	2,38
2038	0,10	2,01
2039	0,08	1,70
2040	0,07	1,43
2041	0,06	1,21
2042	0,05	1,02
2043	0,04	0,86

Fonte: Próprio Autor (2016).

Assim como na produção de metano, a potência máxima alcançada ocorre no último ano de disposição dos resíduos no aterro sanitário, entrando em declínio posteriormente.

4.3. SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E APROVEITAMENTO:

Segundo FIGUEIREDO (2011) o motogerador LANDSET, desenvolvido pela empresa Brasmetano e conforme dados do fabricante tem capacidade de gerar energia elétrica a partir do biogás, com potência nominal de 230 kW, sendo fabricados no Brasil e fornecidos prontos para instalação, possuindo vida útil de 40 a 80 mil horas e uma eficiência elétrica de 28%.

Deste modo, estimando a vazão de CH_4 necessária para a alimentação do motor para gerar uma potência de 200 kW, conforme equação 08 apresentada anteriormente, resulta uma vazão de 223,4 $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{h}$.

Considerando a potência de 200 kW sendo gerada durante um mês inteiro (30 dias) ininterruptamente, visto que o CH_4 é gerado 24 h/dia, chega-se ao total de 144 MWh/mês, considerando a utilização de pelo menos 3 unidades geradoras, devido a interruptibilidade na produção, de modo que a utilização dos equipamentos seja abaixo de sua carga máxima, evitando desgaste acelerado e possibilitando sua manutenção periódica, garantindo assim o funcionamento do sistema.

No ano inicial da operação do Aterro há uma vazão de metano de 310,49 m^3/h , para a geração dos 200 kW, apresentando um excedente de 87,09 m^3/h , que deverá ser queimado em *flare*.

Conforme dados da fornecidos pela empresa SOLURB, o Aterro Sanitário, entre os meses de outubro de 2015 a outubro de 2016, teve seu pico máximo de consumo, em março de 2016, com 14,15 MWh/mês, sendo assim o Aterro Sanitário poderia ser autossuficiente em seu primeiro ano de atividade.

Em uma análise comparativa quanto a vazão de metano e produção de energia, ICLEI (2009) apresenta dois estudos de caso, no primeiro estudo de caso o Aterro Delta A, situado em Campinas/SP, apresentou uma vazão de 1.205,65 $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{h}$, para o ano de 2015, indicando uma potência disponível de 2,13 MW e energia disponível de 44,46 MWh/dia. No segundo estudo de caso apresentado pelo autor, o Aterro de Municipal de Santo André, no ano de 2008, teve uma estimativa de vazão captada para aproveitamento energético de 1.140,34 $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{h}$, indicando uma potência disponível de 2,04 MW e energia disponível de 42,64 MWh/dia.

Comparando assim ao Aterro DAB II, objeto deste estudo, em 2020, ano que alcançará sua pico máximo na geração de metano, terá uma vazão de metano recuperado para aproveitamento energético de 1.147,37 m³CH₄/h, tendo assim um potencial disponível de 2,05 MW e energia disponível de 42,90 MWh/dia, corroborando assim para a validação do trabalho, uma vez que foram utilizadas as mesmas metodologias, baseadas em motogerador ciclo-otto, para determinação da potência e energia disponíveis, conforme a vazão de metano disponível.

5. CONCLUSÃO:

Com o desenvolvimento deste estudo, foi possível calcular as emissões de metano (CH₄) durante os anos de operação, de 2013 a 2020 e após o encerramento, até o ano de 2043, sendo assim possível determinar a capacidade de produção de energia elétrica, com aproveitamento do metano produzido, indicar tecnologia para aproveitamento energético e demonstrar o potencial energético do metano oriundos dos resíduos sólidos urbanos, no Aterro Sanitário DAB II.

O cálculo para estimativa teoricamente das emissões de gás metano durante os anos de operação e após seu encerramento, apresentou uma vazão de metano, em seu ano inicial, 2013, de 306,24 m³CH₄/h, já em seu último ano de disposição, 2020, alcançou seu valor máximo com vazão de metano estimada é de 1.529,83 m³CH₄/h e um total acumulado de 139.938.769,93 m³CH₄.

Deste modo, foi possível determinar que com o aproveitamento de 75% do metano emitido, utilizando como tecnologia para conversão energética os motores de combustão interna, do tipo “Ciclo Otto”, o Aterro Sanitário DAB II possui potencial de geração de energia elétrica de aproximadamente 0,41 MW em 2013, podendo chegar a 2,05 MW em 2020, último ano de disposição.

Observando o pico máximo de consumo do Aterro Sanitário DAB II, entre os meses de outubro de 2015 a outubro de 2016, com valor de 14,15 MWh, no mês de março de 2016.

Foi possível avaliar que, no Aterro Sanitário DAB II, o aproveitamento energético da vazão de metano identificada no estudo, transformada por meio

de motores de combustão interna, do tipo “Ciclo Otto”, apresenta potencial para utilização para geração de energia elétrica, uma vez que conseguiria suprir a demanda por energia do próprio Aterro e gerar excedente, com possibilidade de exploração.

O presente estudo serve também como incentivo para o desenvolvimento de projetos que integrem o uso sustentável dos recursos renováveis com o uso racional e eficiente de energia.

6. REFERÊNCIAS:

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2016). BIG - Banco de Informações de Geração. Capacidade de geração do Brasil.

Disponível

em:

<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>

Acessado em: 24/11/2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. 2014. **PANORAMA dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014**. São Paulo. ABRELPE, 120p. Disponível em: www.abrelpe.org.br
Acessado em: 20/07/2016.

BRASIL. Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei 9.605 de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília, nº 147. p. 03. 2010.

COELHO, Suani Teixeira; VELÁZQUEZ, Sílvia Maria Stortini González; MARTINS, Osvaldo Stella; ABREU, Fernando Castro de. **A conversão da fonte renovável biogás em energia**. Políticas públicas para a Energia. In: V Congresso Brasileiro de Planejamento Estratégico, 2006, Brasília. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/projetos/8_energ-biog.pdf>
Acesso em 01/04/2016.

EPA [U. S. Environmental Protection Agency]. **Summary results from NBB/USEPA tier I. Health and Environmental Effects Testing for Biodiesel Under the Requirements for USEPA Registration of Fuels and Fuel Additives**. (40 CFR Part 79, Sec 21.1 (b)(2) and 21.1 (e)). Final report. Washington, DC: EPA, 1998.

_____. **Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2006**. Washington, DC: EPA, 2007. Disponível em <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 22/08/2016.

_____. **Waste Reduction Model**. Washington, DC: EPA, 2007.
Disponível em <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 22/08/2016.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2030**. 2007. Rio de Janeiro.
Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20080111_1.pdf>
Acesso em 01/04/2016.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS**. Nota Técnica, Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, nov. 2008.
Disponível _____ em:
<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20081208_1.pdf>
Acesso em 01/04/2016.

FERNANDES, Juliana Gonçalves. **Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental**. 2009. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado) em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2009, 101f.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de Biogás de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás – Estudo de Caso**. 2011. Trabalho de Graduação Interdisciplinar apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2007.

_____. **Utilização de Biogás de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica – Estudo de Caso**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GOUVEIA, N. **Resíduos Sólidos Urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social**. São Paulo, 2012. 8p.

IBAMA - Instituto Brasileiro Do Meio Ambiente E Dos Recursos Naturais Renováveis. **Relatório de Qualidade do Meio Ambiente – RQMA**. 2013. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/rqma/RQMA_2013.pdf> Acesso em 10/10/2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **CENSO DEMOGRÁFICO 2010**. Características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2011

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Glossary of terms. In: __. **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation**: a special report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 2012. p. 555-564. Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX-Annex_Glossary.pdf. Acesso em: 22/08/2016.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual**. In: __. Chapter 6. Waste. Revised 1996. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/ch6ref1.pdf>> Acesso em: 22/08/2016.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE -. **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories**. In: __. Chapter 5. Waste. 2000. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/5_Waste.pdf> Acesso em: 22/08/2016.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. In: __. Chapter 3 Solid Waste Disposal. 2006. Disponível em: < http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5

/V5_3_Ch3_SWDS.pdf>

Acesso em: 16/10/2016.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2007a). Summary for policymakers. In: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer L.A. (Eds.), **Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.

MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia, 2004. **Comunicação Nacional Inicial do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Coordenação-Geral de Mudanças Globais do Clima. – Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 274 p. Disponível em:
< http://www.mct.gov.br/upd_blob/0005/5586.pdf >. Acesso em 10/08/2016.

MCTI – Ministério de Ciência e Tecnologia e Inovação, 2016: **Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação (MCTI), Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima. Brasília, DF.
Disponível em: <sirene.mcti.gov.br/publicacoes>.
Acesso em 12/10/2016.

PARASKAKI, I.; LAZARIDIS, M. **Quantification of landfill emission to air: a case study of the Ano Liosia site in the greater Athens area**. Waste Management & Research, nº 23. p 199-208, 2005.

PMCG, Prefeitura Municipal de Campo Grande. **Plano Municipal de Saneamento Básico – Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**. Campo Grande. MS. 2012.
Disponível em: < <http://www.capital.ms.gov.br/planurb/downloads/plano-municipal-de-saneamento-basico-gestao-integrada-de-residuos-solidos/>>.

Acesso em 10/10/2016.

PMCG, Prefeitura Municipal de Campo Grande. **Perfil Socioeconômico de Campo Grande**. Instituto Municipal de Planejamento Urbano - PLANURB. Campo Grande, 2016.

Disponível em: < <http://www.capital.ms.gov.br/sisgran/#/downloads/> >.

Acesso em 10/10/2016.

REGATTIERI, Carlos Roberto. **Quantificação da emissão de biogás em aterro sanitário: estudo de caso do aterro sanitário de São Carlos. 2009**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-13012011-144938/publico/CarlosRobertoRegattieri.pdf>>

Acesso em: 02/02/2016.

STECH, P.J., **Resíduos Sólidos: Caracterização, Resíduos Sólidos Domésticos: Tratamento e Disposição Final**, 1 São Paulo, CETESB, 1990;

SOLURB Soluções Ambientais SPE LTDA, **Plano técnico para conclusão da implantação, operação, manutenção, monitoramento, fechamento e pós-fechamento do Aterro Sanitário Dom Antônio Barbosa II**. Campo Grande, 2012.

ICLEI, **Manual para aproveitamento de biogás**. São Paulo, 2009, 81 p.